

УДК 614.84

О. О. Кіреєв¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)

Ю. К. Гапон², к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3304-5657)

М. А. Чиркіна-Харламова¹, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)

О. М. Даник¹, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0003-6849-3403)

К. О. Русенко¹, викл. каф. (ORCID 0009-0009-4866-6032)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ГАСІННЯ МЕТАНОЛУ ЛЕГКИМИ СИПКИМИ МАТЕРІАЛАМИ ТА ШВИДКОТВЕРДЮЧИМИ ПІНАМИ

Проведено дослідження вогнегасних властивостей легких сипких матеріалів та швидкотвердіючих пін під час гасіння метанолу. Як сипкі матеріали обрано подрібнене піноскло з розміром гранул 1–1,5 см і спучений перліт зі сферичними гранулами діаметром 1,0–1,5 мм. Встановлено, що піноскло формує нижній шар вогнегасної системи та забезпечує її плавучість, тоді як верхній шар перліту виконує ізолюючу функцію, обмежуючи доступ кисню до поверхні горіння та запобігаючи повторному займанню. Показано, що додаткове подавання розпиленої води на поверхню шару підвищує ізолюючі та охолоджуючі властивості системи, а також сприяє зниженню температури в зоні горіння. Оцінювання вогнегасних властивостей здійснювали із застосуванням концепції базового шару, що дозволило визначити параметри вогнегасних шарів для реальних умов пожежогасіння та адаптувати результати до промислових масштабів. Для можливості таких розрахунків були експериментально визначені насипна густина і плавучість в метанолі обраних сипких матеріалів. Як швидкотвердіючу піну використано систему складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (9 % р-н) + NaHCO_3 (9 % р-н) + карбоксиметилцелюлоза (0,5 % об.) + піноутворювач «Морський» (6 % об.). Встановлено, що час втрати текучості цієї системи становить 60 ± 10 с, що є достатнім для змішування компонентів, спінювання, подавання в осередок пожежі та розтікання по поверхні горючої рідини з подальшим утворенням ізолюючого шару. Проведено порівняльний аналіз ефективності застосування систем на основі легких сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін при гасінні метанолу. Отримані результати зіставлено з даними для гасіння бензину, етанолу та ацетону, що дозволило оцінити перспективність запропонованих вогнегасних засобів для гасіння полярних і неполярних горючих рідин та визначити напрями їх подальшого вдосконалення.

Ключові слова: легкозаймисті рідини, метанол, піноскло подрібнене, полярні рідини, сипкі матеріали, пожежогасіння

1. Вступ

Однією з найбільш складних задач для підрозділів ДСНС є гасіння пожеж за участю полярних легкозаймистих рідин. Для ліквідації таких пожеж малоефективними є піни, одержані з піноутворювачів загального призначення. В такому випадку, згідно з вимогами нормативних документів більшості країн світу, використовують піни на основі спиртостійких піноутворювачів маркування «AR» («alcohol resistant») або «АТС» («alcohol type concentrate») [1–4].

У більшості випадків до складу таких піноутворювачів входять фторовмісні органічні сполуки, які забезпечують утворення тонкої ізолюючої плівки на поверхні горючої полярної рідини. Однак такі піни мають низку суттєвих недоліків: вони руйнуються з часом, особливо під дією теплового випромінювання, у процесі гасіння вони забруднюють рідини, які піддаються гасінню, також відмічаються невисокі економічні показники їх застосування.

Останнім часом фторпохідні, які входять до складу плівкоутворювальних піноутворювачів (ПУ), потрапили під обмеження Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі [5], ратифікованою, зокрема, Україною (Закон

України від 18 квітня 2007 року). При цьому вимоги щодо обмеження використання стійких органічних забруднювачів постійно посилюються.

Аналіз такої ситуації відносно України дозволив авторам роботи [6] зробити висновок, що для обґрунтування та забезпечення можливості подальшого використання плівкоутворювальних піноутворювачів необхідні комплексні дослідження, спрямовані на вдосконалення методів їх знешкодження, а також на пошук альтернативних речовин, використовуваних у рецептурах.

Це у свою чергу зумовлює доцільність розроблення нових підходів до розв'язання проблеми гасіння полярних легкозаймистих рідин.

Наукова проблема полягає у тому, що існуючі піноутворювачі для гасіння полярних рідин мають обмежену ефективність через термічну нестійкість, низьку стійкість до теплового випромінювання та недостатню надійність утворення ізолюючого шару. Виникає необхідність у розробці нових методів пожежогасіння, здатних забезпечити стабільне покриття поверхні горючої рідини, тривалу ефективність під час гасіння та багаторазове використання компонентів, що дозволить підвищити ефективність ліквідації пожеж за участю полярних легкозаймистих рідин.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В наукових джерелах інформації виявлено численні нові підходи до гасіння горючих рідин. Автори робіт [7–8] запропонували для гасіння використовувати ударні хвилі та високошвидкісні імпульси струменів води. Проте такі засоби у випадку гасіння легкозаймистих рідин не забезпечують ефективного охолодження рідини, що призводить до ризику повторного займання.

Також проводяться роботи в напрямку підвищення ефективності пожежогасіння шляхом використання тонкорозпиленої води [9]. Недоліком такого підходу є необхідність забезпечення високої інтенсивності подавання вогнегасної речовини одночасно над усією поверхнею рідини, що горить.

Тверді пористі матеріали, запропоновані для гасіння в роботі [10], потребують додаткових досліджень щодо плавучості та ізолюючих властивостей, щоб забезпечити їх реальне впровадження в практику пожежогасіння.

Недоліком піротехнічних та спучувальних складів [11–13] є низькі охолоджуючі властивості та значні труднощі при спучуванні речовин на поверхні рідин. Для всіх розглянутих засобів гасіння можна відзначити, що вони малоефективні при гасінні легкозаймистих рідин за умов великої площі поверхні горіння.

З інших робіт варто відзначити раніше запропоновані піни швидкого твердіння для ізоляції розливів токсичних рідин [14–16]. Вони мають високу стійкість та ізолюючі властивості. Тверді піни стійкі як на поверхні неполярних, так і полярних рідин. Проте їх вогнегасні властивості раніше не були визначені.

Спеціально для гасіння метанолу було розроблено вогнегасний засіб, який враховує його токсичність [17]. Цей засіб являє собою композитний порошок, який крім подавлення полум'яного горіння викликає загущення метанолу, що, на думку авторів, знижує швидкість випарування і проникнення рідини в ґрунт. Однак для гасіння метанолу на великій площі необхідно забезпечити вогнегасну концентрацію порошку одночасно над усією поверхнею, що обмежує можливості його практичного застосування.

Як перспективний засіб гасіння пожеж класу «В» у роботах [18–20] було обрано вогнегасні системи на основі легких сипких матеріалів. В роботі [21] на ос-

нові аналізу характеристик вогнегасних засобів на основі подрібненого піноскла було зроблено висновок про суттєві переваги таких засобів пожежогасіння. Оцінка проводилась на основі комплексного показника ефективності, який включає, крім вогнегасної здатності, експлуатаційні та економічні характеристики засобу гасіння пожеж класу «В».

Для коректного оцінювання комплексного показника ефективності необхідно використовувати результати, отримані за однакових параметрів проведення експерименту. Крім того, для впровадження нового вогнегасного засобу в практику необхідно отримати дані щодо його вогнегасної здатності для різних горючих рідин.

В якості горючої рідини в теперішній роботі обрано метанол (метиловий спирт), обсяги виробництва якого у світі наближаються до 100 млн тонн на рік [22]. Вогнегасна здатність систем на основі сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін (ШТП) за однакових умов експерименту для метанолу раніше не була визначена.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність кількісних даних щодо вогнегасної ефективності засобів на основі легких сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін за однакових умов експерименту, що ускладнює можливість їх коректного порівняння та впровадження в практику.

3. Мета та завдання дослідження

Метою досліджень є експериментальне визначення вогнегасної здатності та комплексного параметру ефективності систем на основі легких сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін із застосуванням концепції базового шару під час гасіння метанолу, а також проведення порівняльного аналізу їх вогнегасних характеристик при гасінні інших горючих рідин.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести вибір вогнегасних систем на основі сипких матеріалів та швидкотвердіючих пін для гасіння метанолу та експериментально визначити їх насипну густину, вологоутримання і плавучість у метанолі.
2. З використанням концепції базового шару експериментально оцінити вогнегасну здатність обраних засобів під час гасіння метанолу.
3. Встановити можливість багаторазового використання обраних сипких матеріалів під час гасіння метанолу.
4. Провести порівняльний аналіз комплексного параметру ефективності вогнегасних систем на основі легких сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін при гасінні метанолу та інших горючих рідин.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження роботи є процес гасіння метанолу за допомогою швидкотвердіючих пін та вогнегасних систем на основі легких сипких матеріалів. Предметом дослідження є вогнегасна ефективність обраних засобів під час гасіння метанолу.

Робочою гіпотезою є перевага за комплексним параметром ефективності пін швидкого твердіння та систем на основі сипких матеріалів у порівнянні з повітряно-механічними пінами.

У роботі використано елементи економічного аналізу та метод експертного оцінювання фінансових витрат при гасінні пожеж класу «В», а також лабораторні методики визначення вогнегасної здатності обраних засобів під час гасіння метанолу.

Як горючу рідину обрано метанол (CH_3OH), який є найбільш летючим ($T_{\text{кип}}=64,7\text{ }^\circ\text{C}$) та токсичним серед спиртів ($\text{ГДК}_{\text{прз}}=5\text{ мг/м}^3$). Метанол також є найбільш полярним у цьому класі органічних сполук і є багатотоннажним продуктом хімічної промисловості, обсяг виробництва якого наближається до 100 млн тонн на рік [22]. Велика частина метанолу використовується у хімічній промисловості, а також з кожним роком збільшується його застосування як альтернативного палива [23].

Основні пожежні характеристики метанолу наведено в табл. 1.

Табл. 1. Температури кипіння ($T_{\text{кип}}$), спалаху ($T_{\text{сп}}$), займання ($T_{\text{займ}}$) та самозаймання ($T_{\text{сз}}$) метанолу

$T_{\text{кип}},\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{сп}},\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{займ}},\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{сз}},\text{ }^\circ\text{C}$
64,5	6	13	440

Засобами гасіння метанолу можуть бути розпилена вода, вогнегасні порошки та вуглекислий газ. Проте найбільш ефективними засобами гасіння є спиртостійкі піни [24–25]. До комбінованих засобів гасіння метанолу відносять комбінацію вогнегасного порошку з додаванням згущувачів [17].

Під час вибору засобу для гасіння необхідно враховувати розчинність метанолу у воді. Ця властивість призводить до забруднення товарного продукту при використанні водовмісних вогнегасних засобів, таких як піни, розпилена вода чи швидкотвердіюча піна.

5. Вибір та характеристики вогнегасних систем для гасіння метанолу

При виборі легких сипких матеріалів для вогнегасних систем було враховано результати робіт [18–20]. Для нижнього шару, що забезпечує плавучість, обрано подрібнене піноскло (ППС) з розміром гранул 10–15 мм. Для верхнього ізолюючого шару використано спучений перліт з розміром гранул 1,2–1,5 мм.

З урахуванням висновків робіт [14–16] про високі ізолюючі властивості, як система для утворення швидкотвердіючої піни (ШТП) було використано композицію: рідке скло (9 % р-н) + NaHCO_3 (9 % р-н) + піноутворювач «Морський» (6 % об.). Для легких сипких матеріалів за методикою [19] експериментально визначали насипну густину, вологоутримання та плавучість у метанолі для ППС і перліту. Отримані дані наведено в табл. 2.

Табл. 2. Розмір гранул (l), плавучість в метанолі (Пл), насипна густина (ρ), вологоутримання (ВУ), для ППС і перліту

Матеріал	l , мм	Пл, %	ρ , кг/м^3	ВУ, %
ППС	10–15	54	105	34
перліт	1,2–1,5	26	165	44

Методика одержання ШТП (розчини гелеутворювача $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ (9 %) + ПУ «Морський» (6 % об.) та каталізатора NaHCO_3 (9 % р-н) + ПУ «Морський» (6 % об.)) наведена у роботі [14]. Такий метод дозволяє визначати не лише об'єм піни, але й її масу шляхом зважування ємності з піною.

Кратність ШТП становила 12 ± 2 , а її густина $\sim 85\text{ кг/м}^3$.

6. Визначення вогнегасної здатності обраних засобів при гасінні метанолу

Методика визначення вогнегасної здатності засобів на основі легких сипких матеріалів з використанням концепції базового шару наведена в роботі [20]. Ті самі параметри лабораторного модельного вогнища пожежі було застосовано для

визначення вогнегасної здатності повітряно-механічних і швидкотвердіючих пін.

У лабораторне модельне вогнище з внутрішнім діаметром 11,2 см і висотою 11,0 см заливалося 110 мл метанолу. Після підпалювання та 1 хвилини вільного горіння подавались вогнегасні речовини. Під час вільного горіння полум'я метанолу було прозоре і практично не фіксувалось, а при засипанні сипких матеріалів або подачі ШТП воно ставало яскраво жовтим.

У випадку сипких матеріалів засипався базовий шар піноскла висотою 4 см. Надалі через одну хвилину послідовно додавалися шари перліту або ППС висотою 0,5 см. Додавання матеріалу тривало до моменту припинення горіння. Досліди проводилися у двох варіантах – з подаванням розпиленої води на верхню поверхню шару (питомою витратою 1 кг/м², тобто 10 г на модельне вогнище) та без води.

Етапи гасіння метанолу системою ППС + перліт наведено на рис. 1 та рис. 2.



Рис. 1. Етапи гасіння метанолу системою ППС + перліт (горіння після засипки шару ППС висотою 4 см)

У випадку гасіння ПВМ і ШТП в таку саму ємність заливалося 210 мл метанолу, що забезпечувало той самий рівень горючої рідини, як і після нанесення базового шару ППС у дослідах з сипкими матеріалами. Після 1 хвилини вільного горіння на поверхню метанолу по нахиленому жолобу рівномірно подавалась піна до моменту припинення горіння. На етапі подачі ШТП полум'я з безбарвного ставало яскраво жовтим (рис. 3 та рис. 4).



Рис. 2. Етапи гасіння метанолу системою ППС + перліт (горіння після нанесення шару ППС 3,5 см)

Після гасіння вимірювали висоту твердої піни та її масу шляхом різниці маси ємності з піною та маси ємності з залишком піни. Вогнегасна висота шару ШТП склала ~3 см, а його маса ~29 г. Після цього проведено дослід із повторного займання лабораторного вогнища шляхом піднесення відкритого джерела полум'я – займання не спостерігалось більше двох годин.



Рис. 3. Подавання ШТП на поверхню метанолу в лабораторному модельному вогнищі



Рис. 4. Припинення горіння метанолу після подавання ШТП

Експериментальні результати представлені в табл. 3. Для порівняння наведено дані, отримані за тією самою методикою для етанолу, ацетону та бензину. Данні (табл. 1) містять первинні експериментальні показники, визначені за методикою «базового шару» ППС, що відповідає умовам, коли бінарна вогнегасна система осаджується на дно модельного вогнища пожежі.

Табл. 3. Висоти (Н) та маси (М) сипких матеріалів і які потрібні для гасіння метанолу, етанолу, ацетону і бензину в разі осадження сипких матеріалів на дно

Вогнегасна система, що осаджується на дно				
Вогнегасна система	ППС	ППС+H ₂ O	ППС+пер	ППС+пер+H ₂ O
метанол				
Н, см	7,5	6,5+0,1	4+1,5	4+0,5+0,1
М, кг/м ²	7,9	6,8+1=7,8	4,2+2,4=6,6	4,2+0,8+1=6,0
ацетон				
Н, см	7,5	6,5+0,1	4+2	4+1+0,1
М, кг/м ²	7,9	6,8+1=7,8	4,2+3,3=7,5	4,2+1,7+1=6,9
етанол				
Н, см	7	5+0,1	4+1	4+0,5+0,1
М, кг/м ²	7,4	5,3+1=6,3	4,2+1,65=5,85	4,2+0,8+1=6,0
бензин				
Н, см	11	9+0,1	4+2	4+1+0,1
М, кг/м ²	11,6	9,5+1=10,5	4,2+3,3=7,5	4,2+1,7+1=6,9

У табл. 4 наведено результати для умов, близьких до реальних пожеж у резервуарах з горючими рідинами, коли бінарний шар, утворений сипкими матеріалами, не осідає на дно резервуару. У роботі [19] запропонована методика розрахунку ре-

альної висоти нижнього шару ППС, який забезпечує утримання верхнього ізолюючого шару бінарної вогнегасної системи на основі ППС і перліту. Для розрахунку використані дані про плавучість сипкого матеріалу в метанолі, його насипну густину та вологоутримання (табл. 2). Верхній шар системи складається зі шару ППС висотою 2 см, шару перліту або додаткового шару ППС різної висоти залежно від горючої рідини, а також води, яка змочує верхній шар сипкого матеріалу.

Табл. 4. Висоти (Н) та маси (М) сипких матеріалів і ШТП які потрібні для гасіння метанолу, етанолу, ацетону і бензину в разі не осадження сипких матеріалів на дно

Вогнегасна система	ППС	ППС+H ₂ O	ППС+пер	ППС+пер+H ₂ O	ШТП	ПМП
метанол						
Н, см	11	8+0,1	6+1,5	5,5+1+0,1	3,0	3,5
М, кг/м ²	11,6	8,4+1=9,4	6,3+2,6=8,9	6,3+1,7+1=8,0	2,9	0,16
ацетон						
Н, см	11	8+0,1	6+1,5	5,5+1+0,1	2,8	3,2
М, кг/м ²	11,6	8,4+1=9,4	6,3+2,6=8,9	6,3+1,7+1=8,0	2,9	0,14
етанол						
Н, см	10,5	7+0,1	6,5+1	6,1+0,5+0,1	2,5	3,5
М, кг/м ²	11	7,3+1=8,3	6,8+1,7=8,5	6,4+0,85+1=8,3	2,6	0,15
бензин						
Н, см	18	15	6,5+2	5,5+1+0,1	2,8	3,5
М, кг/м ²	18,9	15,8	6,8+3,3=10,1	6,3+1,7+1=9,0	2,9	0,16

У табл. 4 також наведені відповідні результати для етанолу, ацетону та бензину [19–21, 26]. Надалі при обговоренні експериментальних даних розглядатиметься випадок, коли бінарний шар сипких матеріалів не осідає на дно ємності.

7. Дослідження можливості багаторазового використання сипких матеріалів для гасіння метанолу

Раніше було встановлено можливість багаторазового використання ППС і перліту при гасінні світлих нафтопродуктів (бензин) [18] і легкозаймистих полярних рідин (ацетон і етанол) [19–20]. За аналогічною методикою визначено можливість триразового використання ППС і перліту при гасінні метанолу. При цьому встановлено, що близько 4 % гранул сухого ППС руйнується до дрібних частинок, тоді як змочене піноскло практично не зазнає руйнування. Втрати як сухого, так і змоченого перліту не перевищують 2 %.

Результати гасіння метанолу при повторному (другому і третьому) використанні матеріалів не відрізнялися від результатів первинного застосування.

Водночас встановлено, що при гасінні висококиплячих рідин (дизельне паливо, машинне мастило) руйнується до ~20 % ППС, а на поверхні гранул утворюється шар сажі. Це свідчить про те, що ефективне багаторазове використання ППС і перліту можливе переважно для гасіння легколетких полярних і неполярних рідин.

8. Визначення комплексного параметру ефективності засобів пожежога-сіння при гасінні метанолу

В ДСТУ 2272 : 2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять» є термін – показник вогнегасної здатності вогнегасної речовини. Цей показник звичайно використовують для характеристики ефективності вогнегасного засобу. Але він враховує тільки одну складову ефективності – масу вогнегасної

речовини, яка витрачається на гасіння одиниці площі пожежі. Але такий підхід до визначення ефективності не враховує експлуатаційних, економічних та екологічних параметрів вогнегасних засобів.

В цій роботі в якості характеристики ефективності вогнегасного засобу прийнято комплексний параметр ефективності запропонований в роботі [21]. Він враховує такі складові:

- 1 – вартість вогнегасних речовин;
- 2 – витрати на зберігання вогнегасних речовин;
- 3 – витрати на переробку або утилізацію вогнегасних речовин;
- 4 – витрати на обладнання та його експлуатацію;
- 5 – складова пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивність подавання вогнегасних речовин вище критичної;
- 6 – витрати на компенсацію збитків від процесу гасіння;
- 7 – витрати на компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин.

Ці складові визначаються за чотирьохбальною шкалою методом експертних оцінок. Відповідні результати для гасіння метанолу наведено в табл. 5.

Табл. 5. Складові комплексного показника вогнегасної ефективності та його сумарне значення для гасіння метанолу

Складові комплексного показника, бали	Вогнегасна система					
	ПМП	ШТП	ППС	ППС+ перліт	ППС+ перліт+ вода	ППС+ +вода
1	4	3,5	1,5	1,6	2,8	3,0
2	2,3	1,5	3,6	3,7	3,4	3,7
3	2,2	1,7	4,0	4,0	4,0	4,0
4	3,0	2,3	3,8	3,0	2,7	3,1
5	2,2	2,4	3,8	3,8	3,5	3,8
6	1,2	1,5	4,0	4,0	3,3	3,3
7	1,6	1,5	4,0	4,0	4,0	4,0
1+7	16,5	14,4	24,7	24,1	23,7	24,9

Табл. 6. Сумарні значення комплексного показника вогнегасної ефективності при гасіння метанолу, етанолу, ацетону і бензину

Горюча рідина	Комплексний показник ефективності, бали					
	ПМП	ШТП	ППС	ППС+ перліт	ППС+ перліт+ вода	ППС+ +вода
Метанол	16,5	14,4	24,7	24,1	23,7	24,9
Етанол	15,8	14,6	23,4	24,1	23,5	24,3
Ацетон	15,7	14,2	24,1	24,4	23,2	25,4
Бензин	16,5	15,2	16,3	23,6	22,2	17,9

В табл. 6 для порівняння наведено сумарні значення комплексного показника вогнегасної ефективності систем на основі легких сипких матеріалів ШТП при гасінні метанолу, етанолу, ацетону і бензину.

9. Обговорення результатів дослідження вогнегасних характеристик

Порівняння показників вогнегасної здатності у масовому вираженні обраних вогнегасних засобів при гасінні метанолу свідчить про значну перевагу повітряно-механічної піни (ПМП) та швидкотвердіючої піни (ШТП) порівняно із системами на основі сипких матеріалів – у десятки разів (табл. 4). Однак в умовах ре-

льних пожеж ця перевага зменшується через швидке руйнування ПМП під дією теплового випромінювання. Із систем на основі сипких матеріалів найкращий результат за показником вогнегасної здатності при гасінні метанолу продемонструвала система ППС+перліт+H₂O.

За комплексним показником вогнегасної ефективності ПМП і ШТП продемонстрували найнижчі результати. Їх перевага проявляється лише за однією складовою – вартістю вогнегасних речовин, що обумовлено значно меншою масовою витратою під час гасіння метанолу. За іншими складовими комплексного показника (експлуатаційними та технологічними характеристиками) ПМП і ШТП суттєво поступаються системам на основі сипких матеріалів. Це пояснюється простотою зберігання сипких матеріалів, можливістю їх багаторазового використання, відсутністю обмежень щодо інтенсивності подавання та стабільністю їх дії. Особливо відзначено, що під час гасіння системами ППС і ППС+перліт практично не погіршуються товарні властивості рідин, що гасяться.

Порівняння комплексного показника ефективності для різних горючих рідин (як полярних, так і неполярних) показує, що системи на основі легких сипких матеріалів мають суттєву перевагу порівняно з ПМП і ШТП, незважаючи на більші масові витрати вогнегасних речовин. Це пояснюється їх перевагами за експлуатаційними та економічними характеристиками. Для гасіння полярних рідин (метанол, етанол, ацетон) найвищу ефективність демонструє змочене ППС, тоді як при гасінні неполярної рідини (бензину) більш ефективною є система ППС+перліт. Це можна пояснити тим, що змочене ППС здатне абсорбувати пари полярних рідин, тоді як для неполярних рідин цей механізм не є визначальним.

Для неполярних легкозаймистих рідин основною складовою вогнегасної дії є ізолюючі властивості. Високу ізолюючу здатність має спучений перліт, а ще вищу – змочений перліт, що входить до складу системи ППС+перліт+H₂O (табл. 4). Ця система забезпечує більшу вогнегасну здатність порівняно з ППС+перліт, проте поступається їй за комплексним показником ефективності (табл. 6). Це пояснюється вищими витратами на обладнання та додатковими витратами, пов'язаними з можливим потраплянням води в горючу рідину і погіршенням її товарних властивостей.

10. Висновки

1. Для формування нижнього шару вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів, що забезпечує її плавучість, обрано подрібнене піноскло з розміром гранул 10–15 мм, тоді як для верхнього ізолюючого шару використано спучений перліт із розміром гранул 1,2–1,5 мм. Як швидкотвердіючу піну застосовано композицію: рідке скло (9 % р-н) + NaHCO₃ (9 % р-н) + піноутворювач «Морський» (6 % об.). Визначено фізико-технічні характеристики подрібненого піноскла і спученого перліту:

- насипна густина: піноскла – 105 кг/м³, перліту – 165 кг/м³;
- вологоутримання: піноскла – 34 %, перліту – 44 %;
- плавучість у метанолі: піноскла – 54 %, перліту – 26 %.

2. Встановлено показники вогнегасної здатності при гасінні метанолу для систем піноскло; піноскло+H₂O; піноскло+перліт; піноскло+перліт+H₂O; швидкотвердіюча піна; повітряно-механічна піна, які становлять відповідно 11,6; 9,4; 8,9; 8,0; 3,1; 0,16 кг/м².

3. Показано, що після гасіння метанолу втрати матеріалів становлять близь-

ко 4 % для піноскла та до 2 % для перліту, що свідчить про можливість їх багатозадового використання без суттєвого зниження ефективності.

4. За комплексним показником вогнегасної ефективності при гасінні метанолу найкращі результати (у порядку зменшення ефективності) продемонстрували системи: піноскло + вода, піноскло, піноскло + перліт, піноскло + перліт + вода. Встановлено, що система піноскло + перліт є найбільш універсальною, оскільки забезпечує високу ефективність як при гасінні полярних, так і неполярних рідин. Повітряно-механічні та швидкотвердіючі піни за комплексним показником ефективності суттєво поступаються системам на основі сипких матеріалів, незважаючи на їх меншу масову витрату вогнегасних речовин.

Література

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 44 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>

2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 41 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>

3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. Euro-pean committee for standardization, 2018. 59 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>

4. Li Zhaoqian, Zhu Hongqing, Zhao Jinlong, Zhang Yilong & Hu Lintao. Experimental research on the effectiveness of different types of foam in extinguishing methanol/diesel pool fires. *Combustion Science and Technology*. 2022. 196(12). P. 1791–1809. doi: 10.1080/00102202.2022.2125306

5. Про ратифікацію Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі: Закон України від 18 квітня 2007 р. Верховна Рада України. *Голос України*. 2007. 19 червня. № 106. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/949-16>

6. Боровиков В. О., Слущька О. М., Сукач Р. Ю., Войтович Д. П. Використання плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж у світлі положень Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі. *Пожежна безпека*. 2025. Вип. 46. С. 5–19. doi: 10.32447/20786662.46.2025.01

7. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6(10(90)). P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

8. Semko A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*. 2017. Vol. 3. P. 655–664. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>

9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the

installation for fire extinguishing with finely dispersed water. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. № 10–92. P. 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

10. Vambol S., Bogdanov I., Vambol V., Suchikova Y., Kondratenko O., Hurenko O., Onishchenko S. Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3. № 5–87. P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

11. Chernukha A., Teslenko A., Kovalov P., Bezuglov O. Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

12. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036

13. Kustov M., Kalugin V., Tutunik V., Tarakhno O. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

14. Pietukhov R., Kireev A., Tregubov D., Hovalenkov S. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374

15. Petukhov R., Kireev A. Modeling the insulation properties of multicomponent solid foam-like material based on gel-forming systems. *Functional materials*. 2021. Vol. 28. № 3. P. 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

16. Mahammad E., Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh. Khudiyev. Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*. 2024. Vol. 25. № 2. P. 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

17. Ni X., Zhang K., Zheng Z., Wang W., Hu S. Application of Composite Dry Powders for Simultaneous Fire Extinguishment and Liquid Solidification of Methanol. *Fire*. 2025. 8(2). P. 69–81. doi: 10.3390/fire8020069.

18. Makarenko V., Kireev A., Slepuzhnikov Y., Hovalenkov S. Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

19. Бабашов І. Б., Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Савченко О. В., Мусаєв М. Є. Результати визначення вогнегасних характеристик легких сипких матеріалів при гасінні етанолу. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 1(37). С. 250–263. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-18

20. Kireev A., Hapon Yu., Chyrkina-Kharlamova M., Nuianzin V., Maiboroda A. Fire extinguishing efficiency of lightweight bulk materials when extinguishing acetone. *Problems of Emergency Situations*. 2025. № 1(41). P. 100–113. doi: 10.52363/2524-0226-2025-41-7

21. Кіреєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Слєпужніков Є. Д., Черкашин О. В. Вибір найбільш ефективного засобу гасіння легкозаймистих рідин. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2024. № 2(40). С. 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3

22. Offermanns H., Schulz K., Brandes E. Substance properties of methanol. In: *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future*, 2014. 677 p. doi: 10.52363/2524-0226-2026-43-14

10.1007/978-3-642-39709-7

23. Zhou F., Yu J., Wu C., Fu J., Liu J., Duan X. The application prospect and challenge of the alternative methanol fuel in the internal combustion engine. *Science of The Total Environment*. 2024. P. 913:169708. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169708

24. Zhang Q., Wang L., Bi Y., Xu D., Zhi H., Qiu P. Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 287. P. 87–92. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017

25. Zhi H., Bao Y., Wang L., Mi Y. Extinguishing performance of alcohol-resistant firefighting foams on polar flammable liquid fires. *Journal of Fire Sciences*. 2020. Vol. 38. P. 53–74. doi: 10.1177/0734904119893732

26. Макаренко В. С. Підвищення вогнегасних властивостей сипких матеріалів шляхом введення кристалогідратів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 2(36). С. 147–158. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-12

A. Kireev¹, DSc, Professor, Professor of the Department

Yu. Hapon², PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Chyrkina-Kharlamova¹, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

O. Danyk¹, Senior Lecturer of the Department

K. Rusenko¹, Lecturer of the Department

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

EXTINGUISHING METHANOL WITH LIGHT, LOOSE MATERIALS AND QUICK-SETTING FOAMS

Investigates the fire-extinguishing properties of lightweight loose materials and rapidly setting foams during the extinguishing of methanol. The loose materials selected were crushed foam glass with a particle size of 1–1.5 cm and expanded perlite with spherical particles 1.0–1.5 mm in diameter. It was found that foam glass forms the lower layer of the fire-extinguishing system and ensures its buoyancy, while the upper layer of perlite performs an insulating function, limiting oxygen access to the combustion surface and preventing reignition. It has been shown that the additional supply of atomized water to the surface of the layer enhances the system's insulating and cooling properties and also contributes to lowering the temperature in the combustion zone. The fire-extinguishing properties were evaluated using the base layer concept, which allowed determining the parameters of the fire-extinguishing layers for real-world firefighting conditions and adapting the results to industrial scales. To enable such calculations, the bulk density and buoyancy in methanol of the selected loose materials were experimentally determined. A system consisting of Na₂O·nSiO₂ (9 % solution) + NaHCO₃ (9 % solution) + carboxymethylcellulose (0.5 % by volume) + «Morsky» foaming agent (6 % by volume) was used as a rapid-setting foam. It was established that the loss of fluidity time for this system is 60 ± 10 s, which is sufficient for mixing the components, foaming, feeding into the fire center and spreading over the surface of the flammable liquid with the subsequent formation of an insulating layer. A comparative analysis was conducted to evaluate the effectiveness of systems based on lightweight loose materials and fast-setting foams in extinguishing methanol fires. The results obtained were compared with data for extinguishing gasoline, ethanol, and acetone, which made it possible to assess the potential of the proposed fire extinguishing agents for extinguishing polar and nonpolar flammable liquids and to identify directions for their further improvement.

Keywords: flammable liquids, methanol, crushed foam glass, polar liquids, bulk materials, fire extinguishing

References

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 44. Available at:

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>

2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 41. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>

3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. European committee for standardization, 59. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>

4. Li, Z., Zhu, H., Zhao, J., Zhang, Y., Hu, L. (2022). Experimental research on the effectiveness of different types of foam in extinguishing methanol/diesel pool fires. *Combustion Science and Technology*, 196(12), 1791–1809. doi: 10.1080/00102202.2022.2125306

5. Verkhovna Rada Ukrainy (2014). Pro ratyfikatsiiu Stokholmskoi konventsii pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi: Zakon Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1700-18>

6. Borovykov, V. O., Slutska, O. M., Sukach, R. Yu., Voitovych, D. P. (2025). Vykorystannia plivkoutvoriuvalnykh pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh u svitli polozhen Stokholmskoi konventsii pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi. *Pozhezhna bezpeka*, 46, 5–19. doi: 10.32447/20786662.46.2025.01

7. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10(90)), 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

8. Semko, A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. (2017). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*, 3, 655–664. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>

9. Dubinin, D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

10. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., Onishchenko, S. (2017). Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 5–87, 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

11. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovalov, P., Bezuglov, O. (2020). Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

12. Vasilchenko, A., Otrosh, Y., Adamenko, N., Doronin, E., Kovalov, A. (2018). Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036

13. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemi-

cal pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

14. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., Hovalenkov, S. (2021) Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. *Materials Science Forum*, 1038, 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374

15. Petukhov, R., Kireev, A. (2021). Modeling the insulation properties of multi-component solid foam-like material based on gel-forming systems. *Functional Materials*, 3, 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

16. Musayev, M., Dadashov, I., Kireev, O., Khudiyev, R. (2024). Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25, 2, 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

17. Ni, X., Zhang, K., Zheng, Z., Wang, W., Hu, S. (2025). Application of Composite Dry Powders for Simultaneous Fire Extinguishment and Liquid Solidification of Methanol. *Fire*, 8(2), 69–81. doi: 10.3390/fire8020069

18. Makarenko, V., Kireev, A., Slepuzhnikov, Y., Hovalenkov, S. (2023). Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*, 954, 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

19. Babashov, I. B., Dadashov, I. F., Kirieiev, O. O., Savchenko, O. V., Musayev, M. E. (2023). Rezultaty vyznachennia vohnehasnykh kharakterystyk lehkykh sypkykh materialiv pry hasinni etanolu. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(37), 250–263. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-18

20. Kireev A., Hapon Yu., Chyrkina-Kharlamova M., Nuianzin V., Maiboroda A. (2025). Fire extinguishing efficiency of lightweight bulk materials when extinguishing acetone. *Problems of Emergency Situations*, 1(41), 100–113. doi: 10.52363/2524-0226-2025-41-7

21. Kirieiev, O., Hapon Yu., Chyrkina-Kharlamova, M., Slepuzhnikov, Ye., Cherkashyn, O. (2024). Vybir naibilsh efektyvnoho zasobu hasinnia lehkozaimystykh ridyn. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(40), 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3

22. Offermanns, H., Schulz, K., Brandes, E. (2014). Substance properties of methanol. In: *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future*, 677. doi: 10.1007/978-3-642-39709-7

23. Zhou, F., Yu, J., Wu, C., Fu, J., Liu, J., Duan, X. (2024). The application prospect and challenge of the alternative methanol fuel in the internal combustion engine. *Science of The Total Environment*, 913, 169708. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169708

24. Zhang, Q., Wang, L., Bi, Y., Xu, D., Zhi, H., Qiu, P. (2015). Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire. *Journal of Hazardous Materials*, 287, 87–92. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017

25. Zhi, H., Bao, Y., Wang, L., Mi, Y. (2020). Extinguishing performance of alcohol-resistant firefighting foams on polar flammable liquid fires. *Journal of Fire Sciences*, 38, 53–74. doi: 10.1177/0734904119893732

26. Makarenko, V. S. (2022). Pidvyshchennia vohnehasnykh vlastyvostei sypkykh materialiv shliakhom vvedennia krystalohidrativ. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(36), 147–158. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-12

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026